

绪 论

食品冷冻技术是一门运用人工制冷技术来降低温度以加工和保藏食品的科学。概括地说，包括以下两方面的内容：

1. 食品的冷却、冷藏、冻结、冻藏、解冻的方法。
2. 食品在冷却、冷藏、冻结、冻藏和解冻过程中的变化，包括食品的物理、化学、组织细胞学的变化。

利用低温来保藏食品是人类在实践中所总结出的经验，我国劳动人民很早就会利用天然冰雪来降低食品的温度，以延长食品的贮藏期。但用天然冰雪来保藏食品的方法受到地区和季节的限制，人们为了扩大天然冰雪的利用，曾经千方百计地贮藏冰雪，来延长对天然冰雪的利用时间。利用天然冰雪保藏食品是一种原始的冷藏方法，天然冰的相变温度为 0 左右，对大多数食品来说，无法达到长期贮藏的目的。

1872 年美国 David、Boyle 和德国人 Carl Von Linde 分别发明了以氨为制冷剂的压缩式冷冻机，从此人工冷源开始逐渐代替了天然冷源，使食品的冷冻、冷藏的技术手段发生了根本性的变革。用冷冻机来直接冻结和冷藏食品有许多优越性：它不受冰融化时间的限制，可以长期保藏食品；能够根据食品冻结和冷藏的需要对温度进行调节和控制；省去了放冰的位置，因而大大增加了保藏食品的数量。因此将冷冻机直接用于食品冷冻的方法迅速得到推广。

尽管人工制冷技术的出现是 19 世纪的事情，食品冷冻技术进入商业化应用却是 20 世纪的事情。许多冷藏库、冷藏车、冷藏船等相继出现，成为贮藏和运输易腐生鲜食品的重要手段。速冻技

术和设备的不断改进，使大部分冷冻食品已能保持新鲜食品原有的风味和营养价值，受到消费者的欢迎。商场中的冷冻食品陈列柜和民用电冰箱的普及，使得冷冻食品在流通领域的质量得到充分的保证。

冷冻食品加工技术的发展与冷冻调理食品的出现，高效率的解冻加热设备如微波炉的日益普及，使冷冻调理食品在国内外已成为方便食品和快餐的重要支柱。我国进入 90 年代后 由于人民生活水平的提高和受到外来食品的影响，我国冷冻食品工业得到迅速发展。1995 年冷冻食品的产量达到 240 万吨左右 年增长速度约 25%。在我国冷冻调理食品中，中式传统点心如肉包、豆沙包、小笼包、水饺、虾饺、汤圆、春卷、烧卖、八宝饭等 占相当大的份额。

现在人们对各种食品的冷冻、冷藏、运输、销售等各个环节的温度条件，有了进一步的认识。目前发达国家已在食品原料的预冷、冷冻食品的加工、保藏、运输、销售、消费等环节形成了较完善的冷藏链，使冷冻食品的质量有了充分的保证。我国对食品冷藏链的建设也相当重视，近年来我国食品冷藏链的建设速度相当快并且日趋完善。

随着人民生活水平的提高，消费者对冷冻食品的质量要求也越来越高 因而对食品在冷冻加工、低温贮藏过程中可能产生的各种变化 如蛋白质的变性、脂肪的氧化、淀粉的老化、维生素的损失、食品的色泽、风味、质地的变化等的研究工作日益深入 因而又不断推进了冷冻食品加工技术的发展。

第一章 食品冷冻技术

第一节 食品冷冻技术原理

一、食品低温保藏基本原理

新鲜食品在常温下(20℃左右)存放,由于附着在食品表面的微生物和食品内所含的酶的作用,使食品的色、香、味变差,营养价值降低。如果食品在常温下久放,就会使食品腐败变质,以致完全不能食用。除了微生物和酶引起的变质外,还有非酶引起的变质,如油脂的氧化酸败等。低温能够抑制微生物的生长繁殖和食品中的酶的活性,降低非酶因素引起的化学反应的速率,因而能够延长食品的保藏期限。

食品的低温保藏可分为两大类:一类是食品的冷却贮藏,另一类是食品的冻结贮藏。前者是将食品的温度下降到食品冻结点以上的某一合适温度,食品中的水分不结冰,达到使大多数食品短期贮藏和某些食品如苹果、梨、蛋等长期贮藏的目的;后者是将食品的温度下降到食品冻结点以下的某一预定温度,使食品中绝大部分的水形成冰结晶,达到使食品长期贮藏的目的(见图 1-1)。

由于食品的低温保藏可分为两类,因此食品冷冻的温度范围也可分为两大类:食品冷却贮藏的温度范围和食品冻结贮藏的温度范围。食品冷却贮藏的温度范围为 $-2\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。例如苹果可以冷却到 -1°C 并在 -1°C 的冷藏室中贮藏;肉类可以冷却到 -1.5°C 并在 -1.5°C 的冷藏室中短期贮藏;而香蕉则必须在

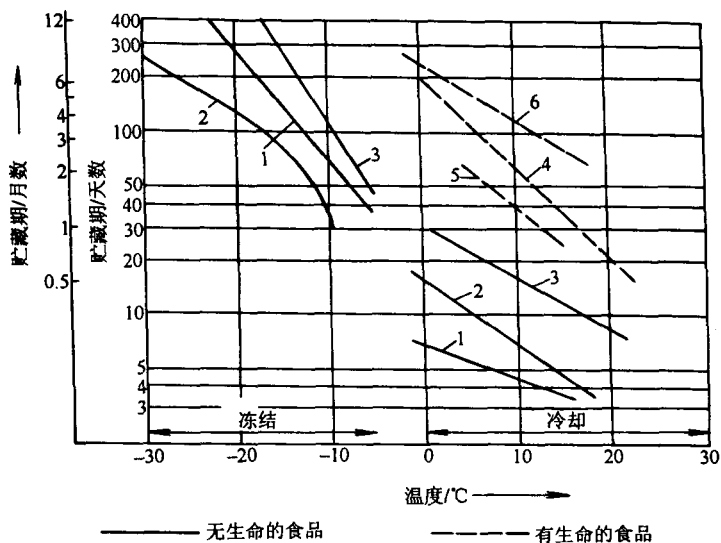


图 1-1 一些冷冻食品的贮藏期与贮藏温度的关系

1. 生鸡 2. 少脂鱼 3. 牛肉 4. 长期贮藏品种的苹果
5. 柑橘 6. 带壳鸡蛋

12 或以上的温度贮藏，否则就会发生生理病害，使香蕉的果皮发黑，果芯发硬；此外，柠檬和番茄等也必须采用较高的冷藏温度。食品冻结贮藏的温度范围为 $-12 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 食品冻结贮藏的温度越低 则食品的稳定性和贮藏期限也越长 但食品冻结贮藏的温度越低，则能量消耗也越大。 -12°C 仅适用于食品的短期冻结。我国食品的冻结贮藏一般是将食品尽可能快速冻结，使其中心温度达到 $-15 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 后 贮藏在 $-18 \sim -23^{\circ}\text{C}$ 的冻藏室中。多脂鱼和容易变色的鱼类宜放在 -25°C 或以下温度的冻藏室中贮藏。现在，欧美和日本等发达国家为了提高冻结食品的质量，多趋向于采用 $-25 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 的冻藏温度。

(一) 低温对酶活性的影响

酶是生物机体组织内的一种具有催化特性的特殊蛋白质。酶的活性与温度有关，在一定的温度范围内（0~40℃），酶的活性随温度上升而增大，但是酶也是一种蛋白质，其本身也会因温度过高而变性，失去其催化特性。在酶促反应中，这两个相反的影响是同时存在的，因此在某一温度时，酶促反应速度最大，这个温度就称为酶的最适温度。大多数酶的最适温度为30~40℃，当温度超过酶的最适温度时，酶的活性就开始受到破坏。当温度达到80~90℃时，几乎所有的酶的活性都遭到破坏。酶的活性因温度而发生的变化常用温度系数 Q_{10} 来衡量：

$$Q_{10} = \frac{K_2}{K_1} \quad (1-1)$$

式中： K_1 ——温度为 t 时酶活性所导致的化学反应率

K_2 ——温度为 $t+10$ 时酶活性所导致的化学反应率

在一定的温度范围内，大多数酶的 Q_{10} 值为2~3，也就是说温度每下降10℃，酶的活性就会削弱至1/3~1/2。低温虽然不能破坏酶的活性，但可以在一定程度上抑制酶的活性。温度越低，对酶活性的抑制作用越强。例如将食品的温度维持在-18℃以下，食品中酶的活性就会受到很大程度的抑制，从而有效地延缓了食品的腐败变质的发生。然而，酶在低温下往往仍有部分活性，因而其催化作用仍在非常缓慢地进行。例如胰蛋白酶在-30℃下仍有微弱的活性，脂肪水解酶在-20℃下仍能引起脂肪的缓慢水解。另外应该引起注意的是，冻结食品在解冻时酶的活性将重新活跃起来，加速食品的变质。

为了将食品在冻结、冻藏和解冻过程中由于酶活性而引起的不良变化降低到最低程度，食品常经过短时间热烫（或预煮）预先将酶的活性钝化，然后再冻结。热烫处理的程度应控制在恰好能

够破坏食品中各种酶的活性。由于过氧化物酶是最耐热的酶，当过氧化物酶失活时可以保证所有的其他酶也受到破坏因此常采用检验食品中过氧化物酶的残余活性的方法，来确定食品热烫处理的工艺条件。

（二）低温对微生物的影响

1. 低温和微生物的关系

任何微生物都有一定的正常生长繁殖的温度范围，温度越低，它们的活动能力也越弱。温度降低到微生物的最低生长温度时微生物就停止生长。许多嗜温菌和嗜冷菌的最低生长温度低于 0°C ，有的甚至可低至 -8°C 。如荧光杆菌的最低生长温度为 $-5\sim-8.9^{\circ}\text{C}$ 。温度降至微生物的最低生长温度以下，就会导致微生物死亡。不过在低温下，微生物的死亡速度比在高温下缓慢得多。

冻结或冰冻介质容易促使微生物死亡，冻结导致大量的水分转变为冰晶体，对微生物的破坏作用很利害。例如微生物在 -8°C 的冰冻介质中的死亡速度比在 -8°C 的过冷介质中明显地快得多，见图 1-2。

2. 低温导致微生物活力降低和死亡的原因

温度下降，微生物细胞内的酶的活性随之下降，使得物质代谢过程中各种生化反应速度减慢，因而微生物的生长繁殖速度也随之减慢。

在正常情况下，微生物细胞内各种生化反应总是相互协调一致的。但在降温时，各种生化反应按照各自的温度系数 (Q_{10}) 减慢，破坏了各种生化反应的协调一致性，从而破坏了微生物细胞内的新陈代谢，使微生物细胞内的原生质黏度增加，胶体吸水性下降，蛋白质分散度改变，并且最后还会导致不可逆的蛋白质凝固，破坏其物质代谢的正常运行，对细胞造成严重的损害。

当食品冻结时，冰晶体的形成会使得微生物细胞内的原生质

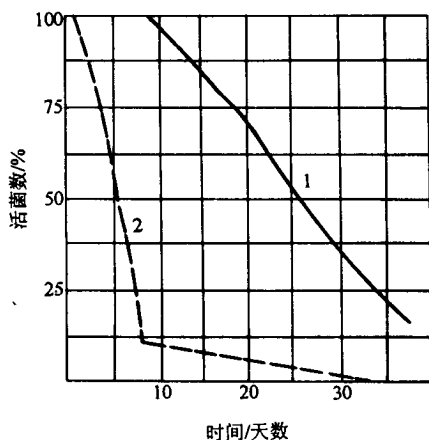


图 1-2 -8 时神灵杆菌细胞的死亡

1. 过冷介质 2. 冰冻介质

或胶体脱水，细胞内溶质浓度的增加常会促使蛋白质变性。同时，冰晶体的形成还会使微生物细胞受到机械性的破坏。

食品的冷却贮藏的温度可阻止某些微生物的生长并大大减缓其他微生物的生长速度。因此，与常温下相比，食品的冷却贮藏可延长食品的贮藏期，而食品的冻结贮藏的温度则可抑制所有微生物的生长。

3. 影响微生物低温致死的因素

(1) 温度

温度在冰点左右或冰点以上，部分能适应低温的微生物会逐渐生长繁殖（见表 1-1）最后也会导致食品变质。这是冷却贮藏的食品不耐久藏的原因。

表 1-1 牡蛎在贮藏过程中细菌数的变化

贮藏期 (d)	下列各贮藏温度(℃)中每毫升的细菌数		
	5	0	-5
0	1600	1600	1600
6	6600	3600	3400
17	66 500	4100	2100
24	1 660 000	8900	1800

冻结温度对微生物的威胁性很大,尤其是 $-2\sim-5$ 的温度对微生物的威胁性最大。但是温度下降到 $-20\sim-25$ 时微生物的死亡反而缓慢得多(见表 1-2) 因为温度低至 $-20\sim-25^{\circ}\text{C}$ 时,微生物细胞内的生化反应几乎完全停止,胶质体的变性也十分缓慢。

表 1-2 荧光假单胞菌在冰冻贮藏中的死亡率

温度(℃)	贮藏时间 (d)	占最初菌数的百分比(%)		
		损伤菌	死亡菌	正常菌
-7	1	25	51	24
	7	17	82	1
	15	1.9	98	0.1
-18	1	41	51	8
	7	34	63	3
	15	12.8	87	0.2
-29	1	35	48	17
	7	39	54	7
	15	36	59	5

(2) 降温速度

在冻结温度以上时,降温越快,微生物的死亡率也越大。这是

因为在迅速降温过程中，微生物细胞内的新陈代谢所需的各种生化反应的协调一致性被迅速破坏。

食品冻结时的情况恰恰相反，缓冻会导致大量微生物死亡，而速冻则相反。因为缓冻时形成量少粒大的冰晶体，不仅对微生物细胞产生机械性破坏作用，还促进蛋白质变性；速冻时食品在对细胞威胁性最大的 $-2 \sim -5$ 的温度范围内停留的时间甚短，而且温度会迅速下降到 -18 以下，能及时终止微生物细胞内酶的反应和延缓胶质体的变性，故微生物的死亡率较低。一般来说，食品速冻过程中的微生物的死亡率仅为原菌数的 50% 左右。

(3) 结合水分和过冷状态

细胞和霉菌的芽孢中的水分含量较低，其中结合水分的含量较高，在降温时较易进入过冷状态，而不形成冰晶体，这就有利于保持细胞内胶质体的稳定性，不易死亡。

(4) 介质

高水分和低 pH 值的介质会加速微生物的死亡，而糖、盐、蛋白质、脂肪等对微生物有保护作用。

(5) 贮藏期

冻结贮藏时微生物的数量一般总是随着贮藏期的增加而有所减少，但贮藏温度越低，减少的量越少。低温对微生物的影响可用图 1-3 概括地加以表示：

大多数食品中毒菌在 10 以上能迅速生长繁殖，某些食品中毒菌和病原菌在温度降低至 3 以前仍能缓慢地生长繁殖。

嗜冷菌在 $0 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 温度范围内仍能缓慢地生长。当食品温度低于 -10°C 微生物停止生长并逐渐死亡，但不会全部死亡。

食品冻结贮藏时微生物数量虽会下降，但和高温热处理具有本质的区别，因为低温并非有效的杀菌措施，而是抑制其生长繁殖的有效措施。

温度为 0 时，微生物的生长繁殖速度与室温时相比已很缓

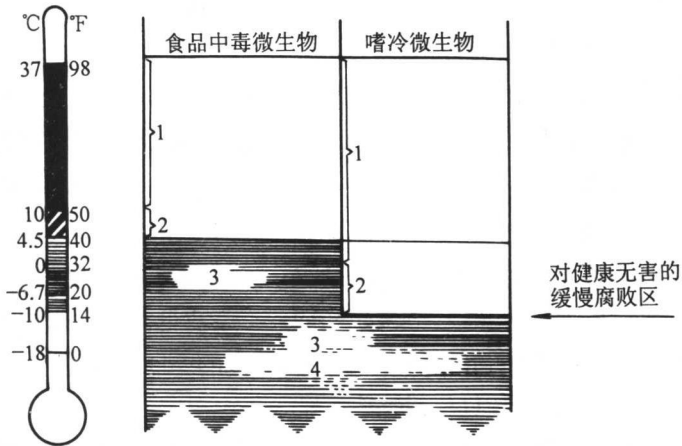


图 1-3 食品中毒菌和嗜冷菌的生长温度范围

1. 生长迅速区段
2. 某些菌缓慢生长区段
3. 停止生长区段
4. 缓慢死亡 但很少全死区段

慢 因此 0 成为食品短期贮藏常用的温度 温度为 -10 时 几乎所有的微生物已停止生长 因此 -10~-12 成为冻结食品能长期贮藏的安全温度。而酶的活性，一般只有当温度下降至 -20~-30 时 才有可能受到很大的抑制。

二、食品的冷却

食品的冷却本质上是一种热交换过程，即让易腐食品的热量传递给周围的低温介质 在尽可能短的时间（一般数小时）内使食品温度降低到高于食品冻结点的某一预定温度，以便及时地抑制食品内的生物化学变化和微生物的生长繁殖。冷却是食品冷藏前的必经阶段。

易腐食品在刚采收或屠宰后立即进行冷却最为理想，这样可以最大限度地保持食品原料的原始质量，抑制微生物和酶引起的

变质。不少例子可以说明，采收或屠宰后若将易腐食品延缓数小时再进行冷却，与采收或屠宰后马上就进行冷却的同类食品比较，在质量上有明显的不同。食品冷却过程中的冷却速度和冷却终了温度是抑制食品本身的生化变化和微生物的生长繁殖，防止食品质量下降的决定性因素。

（一）影响食品冷却过程的因素

影响食品冷却过程中的冷却速度和冷却终了温度的因素有：冷却介质的相态、冷却介质运动的状态（自然流动或强制流动）和速度、冷却介质与食品的温差、冷却介质的物理性质（热容量、导热系数等）、食品的厚度与物理性质（质量热容、导热系数等）。

1. 冷却介质

冷却介质是从食品中吸收热量，并把热量传递给冷却装置的媒介物。通常采用的冷却介质有气体、液体和固体。

在气体介质中普遍采用的是空气。空气随处可得，不需任何费用。但空气的对流放热系数小，冷却速度慢。空气若长时间地作用于食品，会引起食品的不良变化，如空气中的氧与肉中脂肪的氧化作用。当食品没有用不透气的材料包装，并以空气作为冷却介质时，在水蒸气压差的作用下，食品表面的水分会向空气中蒸发，导致食品的重量损失（俗称干耗）。

采用液体为冷却介质的有冷水和水冰混合物。水的对流放热系数大，冷却速度快；用冷水作为冷却介质没有氧化和干耗的问题。但是用冷水作为冷却介质容易对食品造成交叉污染，如禽类冷却时的沙门氏菌污染的问题；用冷水作为冷却介质还会产生食品中可溶性物质的损失和食品的带水量过多的问题。

采用固体作为冷却介质的主要是淡水冰。用冰作为冷却介质，食品的冷却速度比用空气作为冷却介质的快，但比用水作为冷却介质的慢。用冰作为冷却介质，也没有氧化和干耗的问题，但用

冰作为冷却介质有劳动强度较大的缺陷。

2. 食品冷却过程的传热问题

食品在冷却过程中的热交换，既有对流放热也有传导传热。对流放热是流体和固体表面接触时互相间的热交换过程，食品冷却时，热量从食品表面向冷风或冷水传递就属于对流放热。单位时间内从食品表面传递给冷却介质的热量 Q_d 可用下式表示：

$$Q_d = \alpha A (T_s - T_r) \quad (1-2)$$

式中： α ——对流放热系数 [$W/(m^2 \cdot K)$]

A ——食品的冷却表面积 (m^2)

T_s ——食品表面的温度 (K)

T_r ——冷却介质的温度 (K)

从上式可以看出，对流放热的热量与对流放热系数 α 、传热面积 A 、食品表面与冷却介质的温差成正比。

表 1-3 对流放热系数与流体流动状态的关系

冷却介质	流动状态	对流放热系数 α [$W/(m^2 \cdot K)$]
空气	静止	4.6~8.1
	流速 5m/s 以下	$6.2 + 4.2v$
	流速 5m/s 以上	$7.5v^{0.75}$
液体	静止	81.3~174.2
	流动	$58.1 + 348v^{0.5}$

注： v 为流体的流速 (m/s)。

从表 1-3 可以看出流体的流动速度越快则对流放热系数越大。因此当食品进行冷却时，常采用风机或搅拌器强制地驱使流体对流以提高食品的冷却速度。

热量在物体内的传递称为传导传热。食品在冷却时，热量从内部向表面的传递就是传导传热。食品内部有两个不同温度的面，热量从温度高的一面向温度低的一面传递。单位时间内以热

传导方式传递的热量 Q_c (W) 可用下式表示：

$$Q_c = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{X} \quad (1-3)$$

式中： λ ——食品的导热系数 [W/(m·K)]

A ——热传导的面积 (m²)

T_1 、 T_2 ——两个面各自的温度 (K)

X ——两个面之间的距离 (m)

食品的导热系数 λ 的值随着食品的种类而不同，它主要与食品中的含水量和脂肪含量有关 详见表 1-4。

表 1.4 生鲜食品和有关物质的导热系数

物质种类	畜肉	禽肉	鱼肉	水	冰
导热系数 [W/(m·K)]	0.46~0.53	0.41~0.46	0.41~0.46	0.59	2.21

从式 1-3 可以看出 传导传热的热量 Q_c 与厚度 X 成反比 即食品的厚度越小，则食品的冷却速度越快。

(二 食品冷却过程中的冷量消耗

1. 食品冷却过程中的耗冷量

食品进入冷却室后，食品就不断向它周围的低温介质散发热量，直到它被冷却到和周围介质相同的温度为止。冷却过程中食品的散热量常称为耗冷量。假如食品中无热源存在，周围介质的温度稳定不变，食品内各点温度也相同，则食品冷却过程中的耗冷量可按下式进行计算。

$$Q_0 = mC_0(T_{初} - T_{终}) \quad (1-4)$$

式中： Q_0 ——冷却过程中食品的耗冷量 (kJ)

m ——被冷却食品的质量 (kg)

C_0 ——冻结点以上食品的质量热容 [kJ/(kg·K)]

$T_{初}$ ——食品的初温 (K)

$T_{终}$ ——食品的终温 (K)

食品在冻结点以上的质量热容可根据它的组成成分和各成分的质量热容的总和算出。对于低脂肪的食品，特别像水果、蔬菜一类食品，可根据它的水分和干物质含量加以推算，一般干物质的质量热容的变化很小，通常可采用 1.464kJ/(kg·K) 的平均值。低脂肪食品的质量热容可按下式进行计算：

$$\begin{aligned} C_0 &= C_{水} W + C_{干} (1 - W) \\ &= 4.184 W + 1.464(1 - W) \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中： $C_{水}$ ——水的质量热容 [4.184kJ/(kg·K)]

$C_{干}$ ——干物质的质量热容，一般可取 1.464kJ/(kg·K)

W ——食品的含水率 (%)

食品温度高于冻结温度时，食品的质量热容一般很少会因温度变化而发生变化，但是含脂肪的食品则不同，这主要是因为脂肪会因温度变化而凝固或融化，脂肪相变时有热效应，对食品的质量热容有所影响。

然而，牲畜屠宰后其体内实际上仍进行着一系列的生化反应并散发出热量，冷却时每小时每千克肌肉组织的平均散热量为 1.046kJ，肌肉组织仅占胴体的 60%，因而每千克胴体在生化反应过程中的散热量为 0.6276kJ/(kg·h)，禽类和鱼类也一样。考虑到动物性食品的生化反应热，总耗冷量应为

$$Q_{01} = m [C_0(T_{初} - T_{终}) + 0.6276t] \quad (1-6)$$

式中： t ——食品的冷却时间 (h)

由式 1-6 可以看出，生化反应热与冷却速度有关，冷却越迅速，动物胴体散发出的热量就越少，所需的耗冷量也越少，这就是快速冷却的优越性之一。

此外，水果和蔬菜采收后仍然要进行呼吸，同时释放出热量，称为呼吸热，呼吸热随温度下降而减少。呼吸热视果蔬种类的不同而不同，有些果蔬如洋葱、马铃薯和葡萄的呼吸强度比较低，而另一些果蔬如青刀豆、甜玉米、青豆、菠菜、草莓、蘑菇等呼吸强度特别高，因而特别难以贮藏。呼吸热的计算式如下：

$$Q_h = m \cdot H \cdot t \quad (1-7)$$

式中： Q_h ——果蔬呼吸时的散热量 (kJ)

m ——果蔬开始冷却时的质量 (kg)

H ——果蔬的呼吸热 [(kJ)/(kg·h)]

t ——冷却需要的时间 (h)

因此，果蔬冷却时所需的耗冷量可用下式计算。

$$Q_{02} = m [C_0 (T_{初} - T_{终}) + Ht] \quad (1-8)$$

2. 以空气为介质冷却时食品水分的蒸发量和食品的干缩度

食品采用能透过蒸汽的保护膜包装，或食品无任何包装，并在冷空气中冷却时，食品表面除散发热量外，还有水分向外蒸发，使食品失水干缩，俗称冷却干耗。

$$\Delta g = \frac{\Delta G}{m} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中： Δg ——食品冷却时的干缩度 (%)

ΔG ——食品在冷却过程中的水分蒸发量 (kg)

m ——食品的质量 (kg)

食品干缩会导致食品重量减少和品质恶化。果蔬中的水分蒸发会引起萎缩和凋萎，影响其嫩度和抗病能力。果蔬的水分损耗越多，耐藏性越差，遭受病害的可能性越大。肉类中的水分蒸发除导致重量减轻和干缩外，还会引起变色，促进表面氧化。总的来说，干耗是一种不良现象，冷却时间越短，即冷却速度越快，则冷却干耗量越少。肉类在快速冷却时，由于表面水分蒸发，而内层水分不易向表面扩散，在表层（一般不到 1mm 的厚度）的失水率会达

到 50% 左右，因此在其表层会形成坚质的干燥膜，这种干燥膜不仅能防止微生物的入侵和繁殖，而且可以减少冷却干耗。现在有的肉类就采用二阶段快速冷却工艺以提高冷却肉的质量。

食品的水分蒸发率和食品与冷却介质之间的水蒸汽压差，以及食品外露的表面积成正比。食品的水分蒸发时要从食品中吸取蒸发潜热，因此水分蒸发有利于加速冷却。

表面潮湿的食品在冷空气中冷却时，可用焓 - 湿图作进一步的理解 如图 1-4 所示。

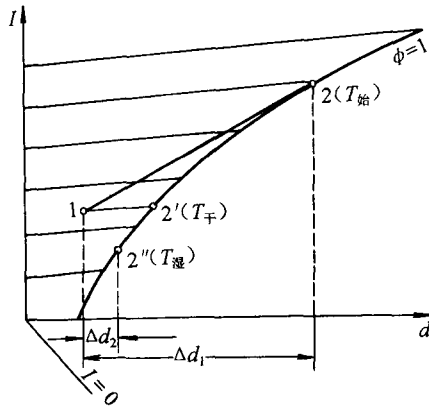


图 1-4 表面潮湿的食品在冷空气中冷却时食品表面附近的空气状态在 $I-d$ 图上的变化

在图 1-4 中点 1 表示冷却室的空气状态，食品进入冷却室时食品周围的空气状态处于高温饱和蒸汽压状态，以点 2 表示食品表面的水分的蒸发强度取决于点 2 和点 1 之间的湿含量差 (Δd_1)。水分蒸发时从食品吸取热量，使食品及其周围空气的温度不断下降。随着温度的下降，点 2 沿着 $\phi=1$ 的饱和曲线不断地下移。当食品表面附近的空气温度降低到点 2' 时 即与空气的干球温度相等时 点 2' 上的湿含量仍然高于点 1 上的湿含量 因此在

湿含量差的作用下食品表面的水分仍然要蒸发。当食品表面温度继续下降到 2" 即空气的湿球温度时,干、湿球温度之间的温度差所能传递的热量恰好等于点 1 与点 2" 之间的湿度差 Δd_2 引起的水分蒸发所散发的热量,于是水分蒸发的速率也就恒定不变。也就是说,随着冷却过程的进行, Δd 逐渐变小,水分蒸发率也逐渐减小,达到点 2" 时,水分蒸发率就不再变化了。显然,食品在冷却和冷藏过程中都会有水分蒸发,但相比之下,冷藏过程中的水分蒸发率比冷却过程的要小得多。

表 1-5 肉类从 36℃ 冷却到 3℃ 时的干缩度 (%)

品名	干缩度 (%)	品名	干缩度 (%)	品名	干缩度 (%)
肥猪肉	1.1	肥牛肉	1.1	肥羊肉	1.4
瘦猪肉	1.5	瘦牛肉	1.4	瘦羊肉	1.5

潮湿食品在冷空气中冷却时,食品表面的水分向空气中蒸发,当空气与冷却排管进行热交换时,这些水分会在冷却排管上冷凝出来。当冷却排管的表面温度高于 0 时,冷凝出来的水分以液态存在,当冷却排管表面的温度低于 0 时,则冷凝出来的水分会结霜,即以固态存在。

在冷却排管上冷凝出来的水分以液态存在时,则冷却排管上所吸收的热量为:

$$Q_{03} = Q_0 + \Delta G \cdot C \cdot \Delta T \quad (1-10)$$

式中: ΔG ——食品在冷却过程中的水分蒸发量 (kg)

C ——水的质量热容 [4.184kJ/(kg·K)]

ΔT ——食品表面与冷却排管表面的温度差 (K)

在冷却排管上冷凝出来的水分若以结霜(即固态)的形式存在,则冷却排管上所吸收的热量为